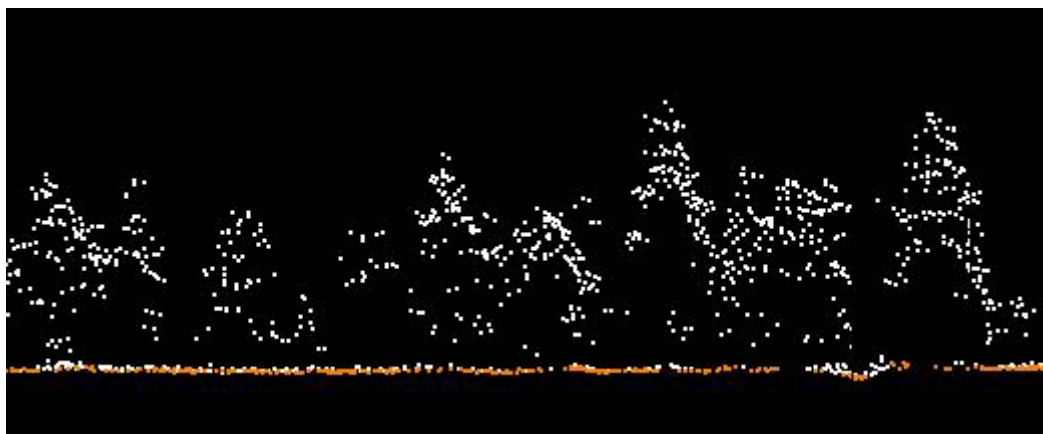




Flygburen laserskanning kopplat till skördarmätning för datainsamling till operativ planering

*Estimation of timber assortments by integration of harvester
measurements
and airborne laser scanner data*



Henrik Larsson

**Arbetsrapport 260 2009
Examensarbete 30hp D
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Johan Holmgren**



Flygburen laserskanning kopplat till skördarmätning för datainsamling till operativ planering

*Estimation of timber assortments by integration of harvester
measurements
and airborne laser scanner data*

Henrik Larsson

Examensarbete i skogshushållning med inriktning mot fjärranalys, 30hp

Jägmästarprogrammet

EX0492

Handledare: Johan Holmgren, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Examinator: Håkan Olsson, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Förord

Detta examensarbete har utförts på Institutionen för skoglig resurshushållning vid Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Umeå. Arbetet omfattar 30 högskolepoäng på D-nivå och är en del av Jägmästarprogrammet. Examensarbetet är utfört på uppdrag av Sveaskog som en del inom projektet IRIS inom ERA-Net programmet WoodWisdom. Även resurser från forskningsprogrammet Heureka har använts i detta examensarbete. Arbetet har genomförts under hösten och vintern 2008/2009. Sveaskogs produktions- och FoU-enhet i Vindeln har i samråd med Lena Jonsson vid Vindelns försöksparker planerat och låtit utföra avverkningarna. Avverkningssentreprenören genom Lars-Anders och Tobias Gustavsson var ovärderlig vid avverkningen av provytorna.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Johan Holmgren utan vars hjälp jag aldrig skulle ha klarat av att få ihop alla beräkningar på laserdata. Jag vill tacka min biträdande handledare Andreas Barth på Skogforsk som hjälpt till med att plocka fram information ur skördardata. Ett tack riktas också till Cruse Datakonsult för hjälp med GIS-programvaran till skördaren.

Henrik Larsson

Sammanfattning

Det ställs allt högre krav på den operativa planeringen. Skogsindustrin vill ha bättre kontroll samt kunna styra virkesflödet bättre. En mer marknadsanpassad avverkning är önskvärd. Detta skapar dock problem för den operativa planeringen på grund av den datainsamlingsmetod som används. Information om diameterfördelning, stamform etc. saknas oftast.

I och med utvecklingen av utnyttjandet av flygburen laserskanning som en del vid skattning av skogliga variabler vore det aktuellt att i högre grad även använda denna nya teknik för den operativa planeringen. Även informationen och kapaciteten i skördarnas datorer har förbättrats och borde kunna utnyttjas mer i planeringsarbetet. Att i framtiden sammankoppla laserdata med mätdata från skördare skulle förbättra möjligheten att simulera apteringar över hela den utvalda traktbanken. Detta examensarbete visar på att den här typen av datainsamlingsmetod som underlag till den operativa planeringen är fullt möjlig. Det förutsätter dock att man löser problemet med att vid avverkning automatiskt positionera platsen för de avverkade träden.

Metoden som förutsätter att datakällorna automatiskt kan kopplas ihop på trädnivå har testats genom att i fält positionera varje enskilt träd inom ett antal olika provytor. Dessa träd har vid avverkning registrerats och senare kopplats ihop med laserdetekterade träd över området. En databas byggs upp med koppling mellan skördarmätningar och lasermätningar för de enskilda träden. För ett okänt träd inom ett område som ännu inte har avverkats söker man i databasen efter ett träd som redan har avverkats och som är så likt det okända trädet som möjligt enligt laserdata. Man tilldelar (imputerar) det liknande trädets skördarmätningar till det okända trädet.

Vid utvärderingen definierades ytan för ett bestånd som fyra ihopslagna provytor med 10 m radie, placerade med 50 m förband inom samma slutavverkningstrakt. Resultaten visar på rimliga skattningar av medelvolym ($RMSE = 11\%$), medelhöjd ($RMSE = 5\%$) och diameterfördelning ($Error\ index = 0.36$) på beståndsnivå ($\sim 0.1\ ha$). Metoden ger bäst skattning för medelhöjd men fångar även upp en vägvisande bild över diameterfördelningen och volymutfallen för de olika stocktyperna. Det finns en stor utvecklingspotential av metoden, främst kring trädkopplings- och imputeringsprocessen.

Nyckelord: LIDAR, laser, skördardata, imputering

Summary

The requirements for operative planning activities are increasing. The forest industry wants to gain better control over wood flow. A felling that is more market adjusted is desirable. However, this causes problems in the operative planning process because of the data collection methods used today. Data about timber assortments and data about the distribution of the tree diameter, etc., are often lacking.

Airborne laser scanning is used to a greater extent than before for estimation of forest variables and should perhaps be used to the same extent in operative planning activities as well. Also, the capacity of the harvester's computer systems has improved and should therefore be made more use of than it is today. In the future, the ability to combine laser data and measurement data from the harvester would make it possible to simulate adaptations across stands. This study shows that this type of data collection method is fully possible, provided that the problem with positioning the exact location of the felled trees is solved.

This master's thesis has examined the method of determining the GPS-position in field of all individual trees inside different plots. The harvester then has identified and registered the different trees inside the plots. A connection has been made between the GPS-positioned trees and the crown segment detected with the laser data.

The result of this study shows reasonable estimates of average stem volume (RMSE = 11 %), average height (RMSE = 5 %) and distribution of the tree diameter (Error index = 0.36) at stand level (~ 0.1 ha).

Keywords: LIDAR, laser data, bucking information, imputation

Innehållsförteckning

Förord.....	2
Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning	6
Flygburen laserdata	7
Skördardata	8
Mål	9
Material	10
Geografiskt område.....	10
Fältdata.....	11
GPS-punkter.....	11
Skördardata	11
Flygburen laserdata	12
Laserskanningen	12
Metod	13
Kronsegment	13
Provytematchning	13
Trädkoppling.....	15
Imputering.....	16
Utvärdering	18
Resultat	19
Trädkoppling.....	19
Provytenivå	19
Beståndsnivå (Provytekluster)	22
Diameter, höjd, stamantal	22
Volym	24
Diameterfördelning	25
Diskussion.....	27
Möjliga felkällor	27
Error index	28
Diameterskattning	28
Höjdsfattning.....	28
Stamantal.....	28
Volymfattning.....	28
Resultatens användbarhet.....	29
Slutsatser	30
Referenser	31
Bilaga 1	33
Bilaga 2	38

Inledning

I samband med den operativa planeringen väljs de bestånd som ska slutavverkas inom den närmsta framtiden ut, en så kallad traktbank byggs upp. Den operativa planeringen bygger på kända data om bestånden, såsom ålder, medeldiameter, medelhöjd och grundyta. Planeringshorisonten för en traktbank sträcker sig från några veckor fram till något år.

Det ställs allt högre krav på den operativa planeringen. Skogsindustrin vill ha bättre kontroll och vill kunna styra virkesflödet bättre. En mer marknadsanpassad avverkning är önskvärd, d.v.s. att skogen skall leverera det som industrin efterfrågar s.k. kundorderstyrning. Detta skapar dock problem i den operativa planeringen. Data över trakter före avverkning är ofta bristfälliga och består främst av beståndsvisa skattningar, såsom medelvolym per hektar, stamantal, medelhöjd och trädslagsblandning. Utifrån den information som finns är det således svårt att skatta virkesutfallets fördelning över olika virkessortiment. En av de viktigaste komponenterna vid skattning av olika virkessortiment är diameterfördelningen (Arlinger m.fl. 2002). Vid skördarmätning registreras en diametermätning var 10:e centimeter längs stammen, vilket innebär att bra information om stamformen samlas in automatiskt.

Data för de utvalda avverkningstrakterna kan samlas in på olika sätt. Inventeringsmetod väljs utifrån hur hög noggrannhet som anses nödvändig samt hur mycket inventeringen får kosta. För att få mer specifik och korrekt information om skogstillståndet krävs ofta arbetsintensiva fältinventeringar. Det finns några olika framarbetade inventeringsmetoder att välja bland: mätning av beståndets alla träd (s.k. stamräkning), objektiva stickprovsmetoder, och subjektiva stickprovsmetoder (Lindgren 1983).

På Sveaskog samlas data över trakterna idag in med subjektiva stickprovsmetoder. Data på medelhöjd, grundyta samt medeldiameter registreras.

I och med utvecklingen av utnyttjandet av flygburen laserskanning som en del vid skattning av skogliga variabler vore det aktuellt att använda denna teknik i större utsträckning också för den operativa planeringen. Informationen och kapaciteten i skördarnas datorer har förbättrats och borde kunna utnyttjas i högre grad i planeringsarbetet än vad som görs idag. Skördarnas datorer har blivit snabbare och mer mångsidiga. Från att tidigare varit rena apteringsdatorer får de en alltmer central roll i skogsbrukets informationshantering. Att i framtiden sammankoppla laserdata med mätdata från skördare skulle göra det möjligt att simulera apteringar över hela den utvalda traktbanken. Det förutsätter dock att man löser problemet med att vid avverkning automatiskt positionera platsen för de avverkade träden.

Genom att positionera varje enskilt avverkat träd är det möjligt att sammankoppla data från flygburen laserskanning med trädspecifik information från skördarnas datorer och utnyttja informationen ända ner på enskild trädnivå. Laserdata kan användas som "bärardata" till ännu ej avverkade trakter. Genom att laserskanna ett område (förslagsvis ett distrikt med liknande trädegenskaper) och ta fram ett antal x-variabler ("bärarvariabler") och koppla dessa till skördarmätningar bygger man upp en referensdatabas. För ett ännu ej avverkat område söker man med hjälp av x-variablerna efter skördardata från skog som är mest lik det aktuella området enligt x-variabler från laserdata, de s.k. bärarvariablerna (figur 1).

Tillvägagångssättet kan delas upp i två faser: 1) framtagande av träningsdata genom sammankoppling av skördarmätningar och laserskanning, och 2) prognos av ännu ej avverkade bestånd genom att lyfta över information från skördarmätningar i närområdet med

hjälp av laserdata. Detta förutsätter dock att det kommer att vara möjligt att automatiskt positionsbestämma skördarens aggregat med hög precision (≤ 1 m).

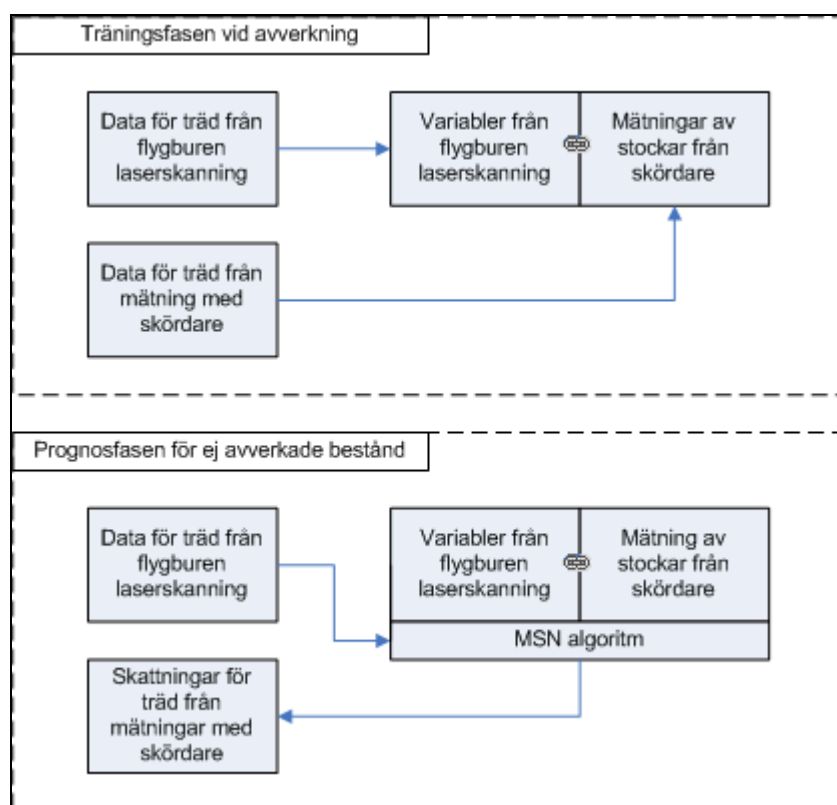


Figure 1. Flödesdiagram över ett eventuellt tillvägagångssätt vid skattning av virkesutfall genom integrering av skördarmätningar och flygburen laserskanning. MSN-algoritmen letar efter samband mellan skördardata och laserdata för att senare kunna använda dessa vid skattning av ännu ej avverkad skog.

Figure 1. An overview of the potential working flow when estimating timber assortments by integration of harvester measurements and airborne laser scanner data.

Flygburen laserdata

Med flygburen laserskanning kan skogen mätas genom att pulser aktivt skickas ut med ett laserinstrument. Pulserna reflekteras sedan från skogen och på så sätt kan avståndet mellan lasern och vegetationen, eller marken, mätas. I och med att laserinstrumentets position, via navigeringssystem, kan bestämmas vid varje ögonblick kan positioner för varje enskild lasermätning också fastställas (Baltas 1999, Wehr & Lohr 1999).

Mätningar med laser kan göras oberoende av dagsljus men kräver att sikten inte är skymd. Flyghöjden bestämmer punkttätheten i mätningarna, en hög höjd ger lägre punkttäthet och sämre upplösning (Baltas 1999, Wehr & Lohr 1999). För att kunna urskilja enskilda träd bör en låg flyghöjd väljas med så hög intensitet som möjligt. Höga flyghöjder används vid DEM-mätningar (digital elevation model) för att skatta höjdskillnader i terrängen, medan lägre flyghöjder utförs för mera specifika objekt, såsom enskilda träd. Utvecklingen av den flygburna laserskanningen gör det möjligt att även vid högre flyghöjder och höga flyghastigheter få en hög intensitet i mätningarna på marken (Flood 2001). Detta kommer att göra laserskanning mer kostnadseffektivt.

Idag används laserskanning tillsammans med traditionell fältinventering för att beskriva skogstillstånd. Med hjälp av statistiska analyser beräknas olika skogliga variabler

(exempelvis höjd, diameter, grundyta, volym) från laserdata över det skannade området (Holmgren 2003, Hyypä m.fl. 2008). Metoder för skattning av skogliga variabler ur laserdata brukar delas in i två huvudkategorier; bestånds-/provytenivå och enskilda träd nivå. (Hyypä m.fl. 2004). Flygburen laserskanning utförs kommersiellt på marknaden sedan ett antal år tillbaka. Ett fåtal firmor erbjuder skogsinnehavare att laserskanna och analysera deras skogstillstånd ner på enskild trädnivå.

Holmgren (2003) har visat att skattningar av skogliga variabler med hjälp av flygburen laserskanning kombinerat med fältdata är lika bra eller bättre än traditionella fältmetoder för skattning på beståndsnivå. Skattningar av medelhöjd och virkesförråd på beståndsnivå hamnar inom medelfel på 3 % respektive 11 %. På enskild trädnivå har 71 % av träden (91 % av den totala volymen) kunnat identifieras via kronsegment (Persson, Holmgren & Söderman 2002). Vidare har skattningar på enskild trädnivå också visat sig falla väl ut. För enskilda träd har stamdiametern (DBH) och trädhöjden skattas med medelfel på 3,8 cm respektive 0,63 m (Persson, Holmgren & Söderman 2002).

Skattningar baserade på algoritmer för att hitta enskilda trädskronsegment beror till stor del på skogens struktur (Persson et al. 2002). Identifieringen av andelen träd kan variera mellan 40 % och 96 %, beroende på höjdfördelningen och tätheten i bestånden. Bestånd med relativt låg variation i höjd och glesare mellan träden ger en högre andel identifierade träd (Persson et al. 2002).

Subjektiva skattningar (i fält) av virkesförråd och medelhöjd ger på beståndsnivå ett medelfel mellan 15 % till 25 %, respektive 10 % (Ståhl 1992). Objektiva provyteinventeringars volymsskattning ger medelfel kring 10 %, men är samtidigt resurskrävande (Fornander 1999). Holmgrens (2003) avhandling om utnyttjandet av laserteknik vid skattningar visar på liknande, eller bättre resultat.

Skördardata

Skördaraggregatens precision i mätningen har förbättrats avsevärt under den senaste tiden och en apteringsgrad runt 98 % (vid 100 % apteringsgrad tillvaratas skogens värde fullt ut med den valda prislistan) uppnås enligt Möller (1998). Dimensionsmätningen har blivit bättre under de fem senaste åren (Arlinger & Möller 2007). I ett virkesvärdestest som Skogforsk utförde 2006 hamnade produktionsaggregaten i medeltal på 84 % inom ± 2 cm vid längdmätningen och 68 % av diametermätningarna hamnade inom ± 4 mm från verklig diameter på bark. Volymberäkningarna i dagens skördare ligger på $\pm 1,5$ % jämfört med manuellt insamlade klavdata. Skattningar av diameterfördelning samt längdfördelning med data från cirkelprovyteinventeringar eller mätdata från skördare stämmer väl överens med varandra (Hansson 1999). En skördare med välkalibrerad mätutrustning har idag en så noggrann mätning att uppgifterna kan användas som underlag för köp av leveransrotposter (Sondell & Möller 2003).

Under de flesta avverkningar lagras information om den avverkade skogen i skördarens apteringsdator. För att underlätta kommunikationen med datorer i skogsmaskiner har skogsbruket och maskintillverkarna enats om en standard för detta (framarbetad av Skogforsk). StanForD (Standard for Forestry Data and Communication) innehåller dels en standard för kommunikation (Kermit), dels en standardiserad filstruktur (Anon 2008a). Information om varje trädskavsmalning, höjd, barktjocklek, kvalitet och defekter sparas i särskilda filer, så kallade stamdatafiler och produktionsfiler (-.stm, -.pri). Detta gör det möjligt att utnyttja informationen från det avverkade området.

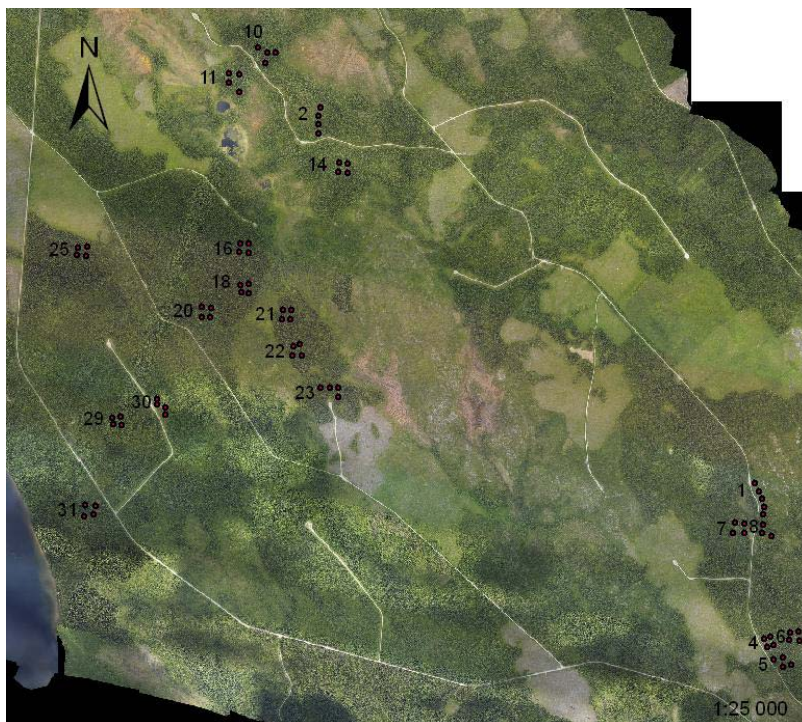
Mål

Målet är att utveckla och utvärdera en metod där kronsegment skapade från laserdata används som bärardata för att lyfta in skördardata till ännu ej avverkade trakter och på detta sätt undersöka om man effektivt kan förutse virkesutfall.

Material

Geografiskt område

Sveaskogs planeringsunderlag har använts för att välja ut 20 stycken slutavverkningstrakter runt Strömsjölidens (64° 6' N, 19° 12' E) i Bjurholms kommun (figur 2). Dessa trakter avverkades under februari månad 2009. Trakterna var både rena tall- och granbestånd, samt blandade tall- och granbestånd. Inom varje avverkningstrakt placerades fyra provvytor, med en radie på 10 m, systematiskt ut med 50 meters förband. Fältdata från provvytorna varierade från 16 – 36 cm i medeldiameter, 98 – 219 dm i medelhöjd, 13 – 43 m² / ha i grundyta, virkesförråd 71 – 431 m³sk / ha och från 223 – 1496 stammar per hektar. Beståndsegenskaperna återfinns i tabell 1.



Figur 2. Karta över de olika beståndens placering i Strömsjölidens försökspark.

Figure 2. A map over the placement of the different stands in the field.

Tabell 1. Beståndsmedelvärden baserat på 4 provytor per bestånd
Table 1. Stand descriptive data from 4 plots per stand

Nr	Medelhöjd (hgv - dm)	Medeldiameter (dgv - cm)	Stamantal (st/ha)	Volym (m ³ sk/ha)	Grundyta (m ² /ha)	Total ålder	TGL
1	107	24	764	134	24	133	910
2	114	23	923	190	32	104	910
4	196	33	334	173	19	134	910
5	173	26	780	222	27	97	181
6	192	28	684	273	30	111	280
7	155	26	1130	214	29	101	550
8	151	24	915	159	22	84	181
10	173	22	1106	234	28	111	181
11	159	23	1098	206	27	119	730
14	181	28	740	220	26	123	820
16	191	27	971	312	35	85	090
18	197	27	963	350	38	107	0X0
20	130	20	979	127	20	92	091
21	121	21	1162	184	30	99	082
22	166	27	859	220	28	105	640
23	179	27	621	214	26	116	280
25	138	24	844	214	31	107	091
29	173	24	677	200	25	111	190
30	172	25	772	245	31	100	0X0
31	186	27	605	230	26	102	091

Fältdata

Fältinventeringen utfördes i enlighet med instruktionen för Heurekas fältinventering och med dess fältapplikation. Samtliga träd på dessa provytor klavades, trädslag registrerades och höjd mättes för provträd. Ståndortsvariabler registrerade för varje provyta. Varje träd på ytan tilldelades ett identitetsnummer på stammen. I samband med klavningen mättes trädens koordinater relativt provytans centrum med Haglöfs "PosTex" (vilken mäter trädens koordinat relativt centrumpunkten med hjälp av ultraljud).

GPS-punkter

Under tiden som fältmätningarna utfördes loggades GPS-mätningar för provytans centrum- och norrpunkt. För detta användes en differentiell GPS (GMS-II och i vissa fall Thales MobileMapper) med efterbearbetning för att få positioneringsfel på under metern. Lantmäteriets SWEPOS-referensstation i Vindeln, cirka 3 mil nordost om Strömsjöliden, användes vid efterbearbetningen av GPS-positionerna.

Skördardata

Vid avverkningen av provytorna registrerades identitetsnumret för varje avverkat träd med skördarens dator. Ett speciellt framarbetat tillägg till skördarens datorprogram användes för att på ett säkert sätt koppla ihop de på provytorna stående träden med de trädstammar som vid avverkning registrerades i skördarens dator. Registreringen av skördarens aptering följde standarden StanForD (Anon 2008a). På skördarens dator installerades kartprogrammet FCGis från Brackesystems (www.brackesystems.com) kopplat till en GPS så att föraren hela tiden

kunde se maskinens och provytornas position på kartan. Då fällning av träd skedde inom en provyta registrerade föraren det identitetsnummer som var märkt på stammen. En kopia av varje stm-fil med information om trädets stamegenskaper skapades och identitetsnumret lagrades i denna extra stm-fil. Utifrån dessa stm-filer skapades en databas med information om de avverade träden med tillhörande unikt identitetsnummer för varje träd.

Flygburen laserdata

Laserskanningen

Laserskanningen utfördes den tredje och den femte augusti år 2008 med TopEye system S/N 425 monterat på helikopter SE-HJC från 500 meters flyghöjd med tvärstråk flugna på 250 meters flyghöjd. Den genomsnittliga punkttätheten var cirka 5 punkter/m² i enkelstråken och cirka 15 punkter/m² vid överlappande tvärstråk. Täckningskontroll av laserdata utfördes visuellt. Området var helt täckt med undantag för vatten. GPS-mätningarna efterbearbetades mot SWEPOS referensstation i Vindeln samt med framtagna virtuella referensstationer. De virtuella referensstationerna beräknades utifrån omkringliggande SWEPOS-stationer. Efterbearbetningen av GPS-positionerna för flygstråken gav ett medelfel på 6,8 cm samt en maximal avvikelse på 49 cm för markpunkterna.

Metod

Den metod som undersöktes i detta examensarbete bygger på att skördardata kopplas ihop med laserdata och därigenom utnyttja samband för att skatta virkesutfall för ännu ej avverkade trakter. Med hjälp av data från laserskanningen skapas kronsegment med tillhörande specifika variabler. Kronsegmenten kopplas ihop med de vid avverkningen registrerade och i fält positionerade träden. En trädlista skapas som används vid en imputeringsprocess (tilldelningsprocess) där en algoritm letar efter samband mellan avverkad skog och ännu ej avverkade skog i närområdet. Imputeringsprocessen medför att skördardata lyfts in till skogar från de avverkade trakterna med mest likheter för den aktuella skogen enligt laserdata. Ett översiktligt flödesdiagram återfinns i figur 1.

Kronsegment

Punkterna (x,y,z) i laserdata klassificerades som mark och icke-markträffar (Axelsson 1999, Axelsson 2000). Detta gjordes med hjälp av applikationen TerraScan (www.terrasolid.fi) i MicroStation (Soininen 2004). Med hjälp av markträffarna interpolerades en markmodell. Det vertikala avståndet till marken beräknades för varje laserretur och utifrån dessa avstånd skapades en höjdmodell som beskrev vegetationen. Klassificeringen gjordes med parametrarna enligt tabell 2.

Tabell 2. Inställningarna vid klassificeringen av mark och icke-markträffar med TerraScan
Table 2. The settings of the configuration file for the software TerraScan while doing the classification of ground and none-ground laser hits

Max building size	Terrain angle	Iteration angle	Iteration distance	Reduce iteration angel when edge length
60.0 m	88.0 °	6.0 ° to plane	1.4 m to plane	< 5.0 m

Baserat på den utifrån laserdata skapade höjdmodellen gjordes en segmentering, vars segment skapades utifrån en algorithm vilken letade efter trädkronornas utbredning (Holmgren & Wallerman 2007). Inom varje segment skapades ett antal variabler som beskrev trädkronorna, till exempel percentiler från höjdfördelningen av laserhöjder inom kronan, kronans diameter, etc. Dessa variabler som beräknades för varje kronsegment användes som bärarvariabler vid imputeringen. Ett kronsegment kan innehålla ett eller flera trädstammar beroende på hur väl segmenteringsprocessen fallit ut. Segmentering utfördes med hjälp av programvaran mtreecpp och med de ingående parametrarna enligt tabell 3.

Tabell 3. Inställningarna i segementeringsprogramvaran mtreecpp. R = storlek för utjämnande filter, H = tröskelvärde för höjden, N = minsta antalet laserträffar för ett modelltest, Ratio = minsta möjliga kvot mellan radien och höjden av modellen, RTop = radien för max-filtrering av laserreturer
Table 3. The settings of the configuration file for the software mtreecpp while building segment of tree crowns based on laserdata. R = kernel-size for smoothing filter, H = height threshold, N = minimum number of laser returns for a model test, Ratio = minimum radius / height of model, RTop = radius for maximum filter on raw data

R	H	N	Ratio	RTop
1.0 m	2.0 m	20	0.05	0.3

Provytematchning

En matchning utfördes av trädens GPS-positioner mot de utifrån laserdata skapade kronsegmenten. Varje kronsegment matchades mot intelligande trädposition med beaktande

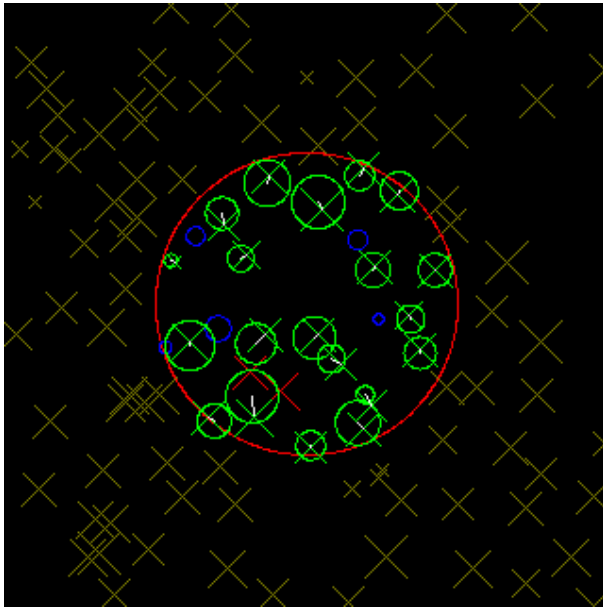
av den ur laserdata registrerade trädstorleken (höjd) mot den i fält registrerade brösthöjdsdiametern (Olofsson, Lindberg & Holmgren 2008). De fältmätta trädpositionerna korrigerades efter det från laserskanningen registrerade trädpositionerna. Parameterinställningarna som användes vid användning av matchningsprogrammet redovisas i tabell 4.

Matchningen utfördes eftersom vissa GPS-fel var för stora för att koppling skulle kunna utföras på trädnivå. Hela matchningsprocessen var automatisk. Två syntetiska bilder skapades (en från fältdata och en från laserdetekterade träd) genom att använda positionen för träden och dess relativa storleksmått (höjden från laserdata och diametern vid brösthöjd från fältdata), figur 3. De två bilderna förskjuts och roteras relativt varandra och det test som ger högst korrelation mellan bilderna väljs.

Tabell 4. Inställningar i konfigurationsfil vid körning av provytematchning. A = storlek på sökområdet, $\Delta\theta$ = steg för rotation av provyta, min/max θ = interval (start och stop) för rotation av provyta, b = sökavstånd för trädkoppling, f = sökfaktor för trädposition, C = parameter som översätter dbh till höjd (svängningsvidd), p = parameter som översätter dbh till höjd (fas), σ_h = parameter för att vikta avstånd i höjddled, σ_r = parameter för att vikta avstånd i markplanet, mpp = upplösning för korrelationsbild

Table 4. The settings of the configuration file for the software. A = size of search area, $\Delta\theta$ = field plot rotation angle increment, min/max θ = field plot rotation end values, b = tree position search bias, eq 4, f = tree position search factor, eq 4. C = tree height estimation amplitude parameter eq 2, p = tree height estimation phase parameter, eq 2. σ_h = height residual error, σ_r = ground distance radial error. mpp = correlation image resolution

A	$\Delta\theta$	min / max θ	B	F	C	P	σ_r	σ_h	mpp
m ²	°	°	M	m / mm	m	1 / mm	m	m	m / pixel
1600	1	10	1,5	0.002	25.5	0.0036	1	3	0.5



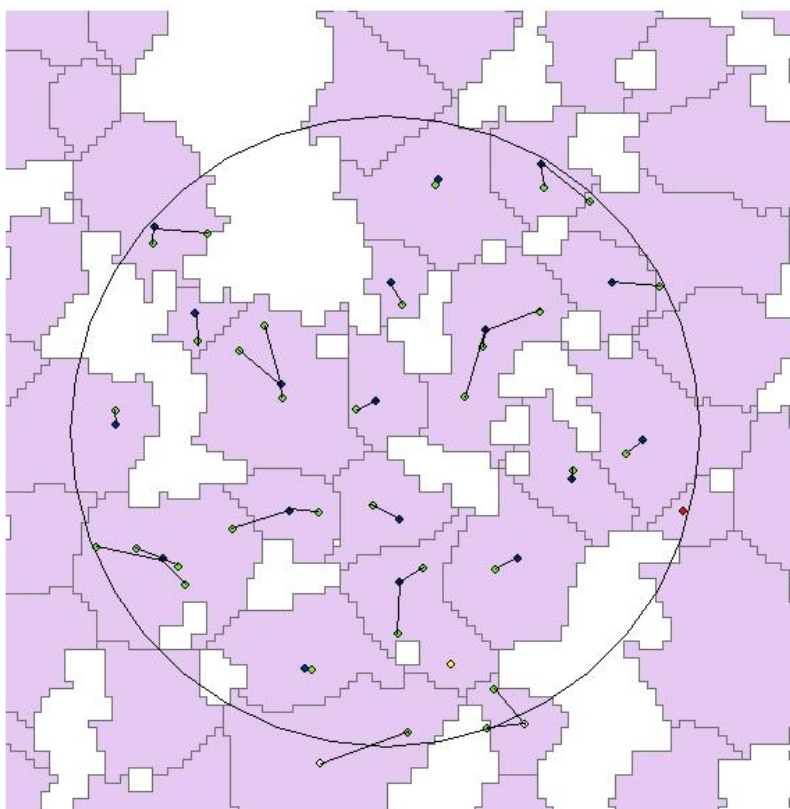
Figur 3. Provytematchning mellan fältdata och laserdetekterade träd. Bilden är skapad genom att använda positionen för träden och dess relativa storleksmått (höjden från laserdata och diametern vid brösthöjd från fältdata). Blå ring = icke-laserdetekterade träd, rött kryss = falska laserdetekterade träd, grön ring och kryss = kopplade träd, brunt kryss = laserdetekterade träd utanför provytan.

Figure 3. Tree fit between field measured trees and detected trees using laser data. Blue ring = field measured tree with no connection to laserdata, red cross = false tree detected using laser data, green ring and cross = linked tree between field measured tree and laser detected tree, brown cross = detected tree outside the plot.

Trädkoppling

För alla provytorna kopplades kronsegmenten (i form av en punkt i segmentets mitt) ihop med de avverkade trädstammarna genom att använda trädens koordinater. Detta gjordes i ArcGis 9.3 och byggde främst på funktionen Spatial Join. De olika träden kopplades till det närmast intilliggande kronsegmentet (med en sökradie på 3 meter), figur 4. Ett segment kunde kopplas till flera träd. För att styra imputeringen skapades dessutom en koppling mellan varje kronsegment och ett unikt trädnummer (det grövsta trädet) med tillhörande trädinformation. I de fall ett kronsegment inom provytan saknade koppling till ett träd registrerades kronsegmentet som falskt (trädinformation noll). På detta sätt skapades en trädlista med unikt kronsegment kopplat till unikt träd.

En sökradie på 3 meter användes vid trädkopplingsrutinen. Träd med ett längre avstånd än 3 meter från ett laserdetekterat träd uteslöts ur trädlistan. Kronsegment utanför provytan men med koppling till träd inom provytan räknades tillhöra provytan. Orsaken till varför en sökradie användes var för att inte riskera att GPS-positionerade träd i allt för stor utsträckning skulle kopplas till laserdetekterat träd utanför provytan. Det var också ett sätt att säkerställa att varje kronsegment kopplades till rätt träd, vilket medför ett bättre material till imputeringsprocessen. Samtidigt fås en uppfattning om hur bra trädpositioneringen och kronsegmenteringen blivit. Desto fler träd som har en sökradie över 3 meter desto sämre kronsegmentering/trädpositionering.



Figur 4. Skiss över trädkopplingen mellan laserdata och trädposition i ArcGis 9.3. Röd punkt = laserpunkt utan trädkoppling, blå punkt = laserpunkt med trädkoppling, vit punkt = laserpunkt utanför provyta men med trädkoppling, grön punkt = trädpunkt kopplat till laserpunkt, gul punkt = trädpunkt utan koppling till laserpunkt (ingen laserpunkt inom 3 meter från trädpositionen), lila = kronsegment skapat från laserdata

Figure 4. An outline of the process to link each tree coordinate to a certain segment derived from the laser hits. Red dot = laser point without tree linked, blue dot = laser point with tree linked, white dot = laser point outside the plot but with tree linked to it, green dot = tree point linked to certain laser point, yellow dot = tree point with no laser point linked to it (no laser point within 3 meter from tree coordinate), purple = crown segment derived from the laser data

Imputering

Vid imputeringsprocessen användes metoden most simliar neighbour (MSN) i paketet *yaImpute* av Crookston och Finley (2007) i statistikprogramvaran R-project (Anon 2008b). Imputeringsmetoden MSN beräknar sambanden utifrån definierade referens- och bärarvariabler i form av relationen mellan dessa olika dataset (Moeur & Stage 1995).

Varje imputering gjordes provytevis, där information från alla de övriga provytorna användes som referensmaterial. Imputeringen utfördes genom de olika kronsegmenten inom provytan. Träden kopplade till kronsegmenten till de övriga provytorna användes som referensmaterial, trädinformationen bildade referensvariabler. Vid imputeringsprocessen användes bara trädinformation från det träd med störst brösthöjdsdiameter kopplat till kronsegmentet som referensmaterial. Vid utvärderingen lyftes dock alla träd som tillhörde de imputerade kronsegmentet in med hjälp av de skapade trädlistorna knutna till de unika kronsegmenten. Referensvariablerna användes för att vikta vilka bärarvariabler (x-variabler beräknade från laserdata) som innehöll väsentligast information om trädets egenskaper. Eftersom MSN som imputeringsmetod viktar de olika bärarvariablerna utifrån bestämda referensvariabler togs alla x-variabler beräknad från laserdata med vid själva imputeringen. De olika bärarvariablerna återfinns i tabell 5 och referensvariablerna i tabell 6.

Alla kronsegment som vid trädkoppling kopplats till ett eller flera träd togs med vid imputeringen, även de kronsegment utanför provytan vars trädkoppling räknades tillhöra provytan. Vid imputeringen togs även kronsegment med som inte hade någon trädkoppling (så kallade falska kronsegment). De falska kronsegmenten fick referensvärdet noll för de olika variablerna. Positionerade träd som hade ett avstånd till närmsta laserdetekterat träd som översteg sökradien på 3 meter uteslöts helt från materialet. I figur 4 visas exempel på alla de ovan beskrivna fallen.

Tabell 5. Variabler framtagna från laserdata per detekterat kronsegment (s.k. bärarvariabler)

Table 5. Carrier variables for each crown segment derived from the laserdata

Bärarvariabel	Förklaring
C	Kronsegmentets diameter
Percentil 10, 20, ..., 90, 95, 100	Percentiler av höjdfördelningen från lasermätningar inom ett kronsegment över ett tröskelvärde (ej mark eller låg vegetation som buskar och stenar)
Avg	Medelhöjden av höjder inom kronsegment (över tröskelvärde)
Stdh	Standardavvikelsen av höjder inom kronsegment (över tröskelvärde)
Number	Antalet lasermätningar inom ett kronsegment
crownheight	Mått från laserdata relaterat till krongräns
meanintense	Medelintensiteten för laserreturer inom ett kronsegment
P_single	Andelen enkelreturer från ett kronsegment

Tabell 6. Det olika variablerna från referensdata som användes vid imputeringen

Table 6. Variables used as reference data in the impute process

Max diameter	Höjd till sista kap	Total stockvolym
Brösthöjdsdiametern från det träd med störst diameter kopplat till kronsegmentet (0 dm när ingen trädkoppling skett)	Höjd enligt skördarmätningen till sista kap	Summan av de apterade stockvolymerna vid avverkningen för trädet.

Utvärdering

Imputeringen utfördes genom att data från andra provytor än den i fråga lyftes in för varje kronsegment inom provytan. Eftersom det vid imputeringen enbart användes trädinformation över det största trädet kopplat till kronsegmentet lyftes det vid utvärderingen in samtliga träd, även de träd som inte hade den största brösthöjdsdiametern av de träd som kopplats till kronsegmentet. Detta gjordes med hjälp av trädlistan med information om tillhörande unikt kronsegment. En trädlista med samtliga träd imputerade till provytorna genom kronsegmenten skapades.

Jämförelsen mellan imputerade och verkliga mätningar i resultaten är baserad på trädlistan skapad vid trädkopplingen, d.v.s. den fullständiga trädlistan bestående av alla träd kopplade till de specifika kronsegmenten. Träd med ett avstånd som översteg 3 meter till ett laserdetekterat träd har inte tagits med. Detta har medfört att 14 av de 1729 avverkade träden inte kommit med i trädlistan skapad vid trädkopplingen och har därmed inte använts vid jämförelse av medelvärden för diametern, höjden, stamantalet samt volymerna i resultatet.

Den imputerade trädlistan innehöll alla träd kopplade till de imputerade kronsegmenten. Även de träd som inte användes som referensdata till kronsegmentet vid imputeringsprocessen lyftes in vid utvärderingen (träd som inte hade den största brösthöjdsdiametern av träd kopplade till samma kronsegment).

För de olika medelvärdena beräknades root mean squared error (RMSE) ut enligt följande formel:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Nt} \sum_{j=1}^k (F_j - I_j)^2}$$

(F_j = data ur referenslista, I_j = data från imputering, Nt = antal provytor/bestånd)

Vidare beräknades ett error index ut både på bestånds- och provytenivå. Error index beräknar proportionerna av skillnaden mellan två histogram givet fasta klasser (Reynolds m fl. 1988).

$$EI = \frac{1}{Nt} \sum_{j=1}^k |T_j - I_j|$$

(T_j = antalet fältmätta träd i klass j , I_j = antalet imputerade träd i klass j , Nt = totala antalet fältmätta träd, k = antalet klasser)

Med hjälp av den skapade trädlistan vid imputeringen beräknades de olika volymerna fördelade per sortiment och stocktyp ut. Stockvolym och sortimentsvolym är direkt tagna från skördarens aptering. Indelningen för volymer per stock är definierad som; rotstock = volym för första stock med fullängd (längre än 0.5 m), topp- och mellanstocksvolymen = allt utöver det.

Sortimenten delades upp i två klasser. De vid avverkningsklassade som klass 1 och 3, japanklass 1 och klenklass 1 räknades till timmervolymen. Energived och massaved räknades båda till kategorin övrigt.

Resultat

Samtliga provytor från bestånd 4, provytorna 2 och 4 från bestånd 20 och provyta 1 från bestånd 22 uteslöts från imputeringsprocessen på grund av att en fullständig trädlista inte lyckades skapas vid trädkopplingen. Detta på grund av problem i samband med registreringen av de avverkade träden vid avverkningen.

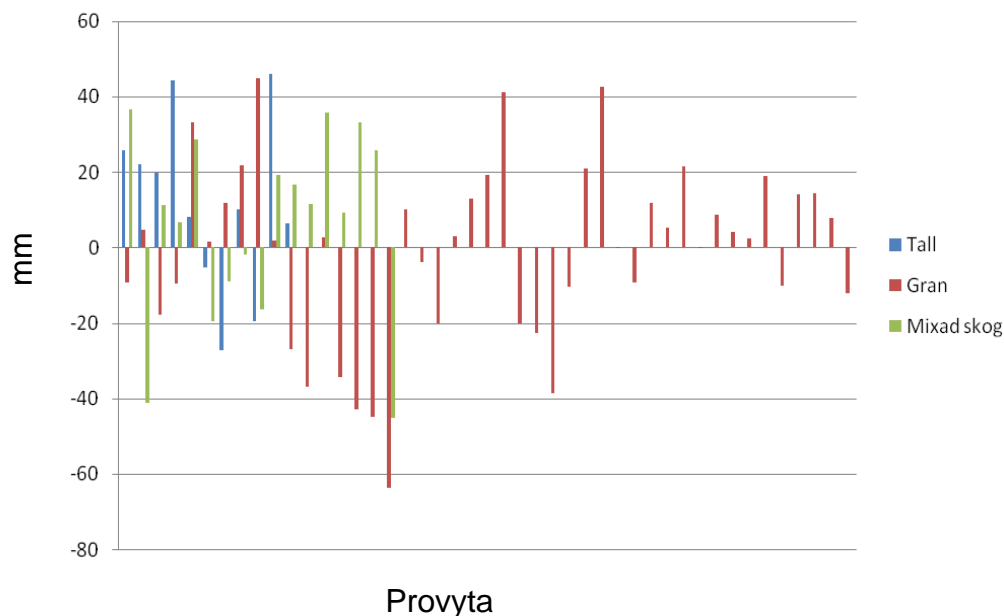
Resultatet presenteras i två nivåer, provytenivå och beståndsnivå (ihopslagna provytor inom samma trakt, max 4 st, min 2 st, 50 m förband mellan provytorna). Diameterfördelningen delades in i 50 mm klasser (från 0 upp till 500 mm) och resulterade i ett error index på 0.56 på provytenivå samt 0.35 på beståndsnivå.

Trädkoppling

Av 1793 avverkade träd var det 14 st (0.78 %) som inte hade ett laserdetekterat kronsegment inom 3 meter, varav hälften var under 10 cm vid brösthöjd. Skillnaden på beståndsnivå mellan trädlistan skapad vid trädkopplingen och den vid avverkningen var som störst för bestånd 11 (2.5 mm i medeldiameter och 4 av 102 träd saknades). I medel påverkades beståndens medeldiametern 0.4 mm och stamantalet med 5 st / ha av de 14 uteslutna träden.

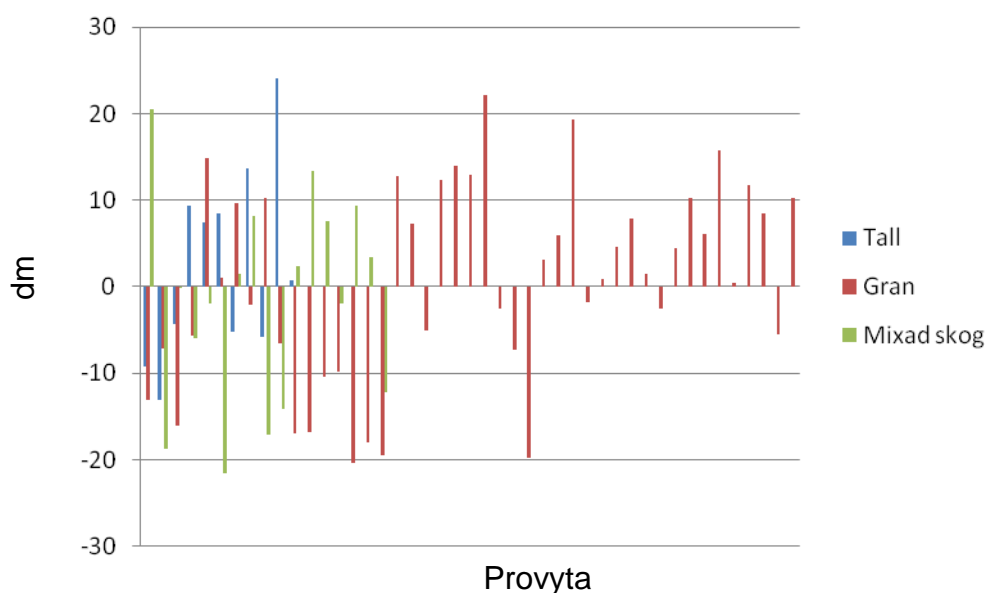
Provytenivå

I figur 5-6 presenteras medelvärdet av brösthöjdsdiametern utifrån imputerade skördarmätningar jämfört med faktisk skördarmätning, även imputerad medelhöjd till sista kap jämfört med den faktiska medelhöjden till sista kap enligt skördarmätningen, uppdelade efter trädslag. RMSE för brösthöjdsdiametern blev 24.2 mm (11.7 %) och 11.4 dm (8.6 %) för medelhöjden till sista kap. Antalet imputerade träd jämfört med det faktiska antalet avverkade träd inom provytan har ett RMSE på 166 st / ha (22.6 %), (figur 7).



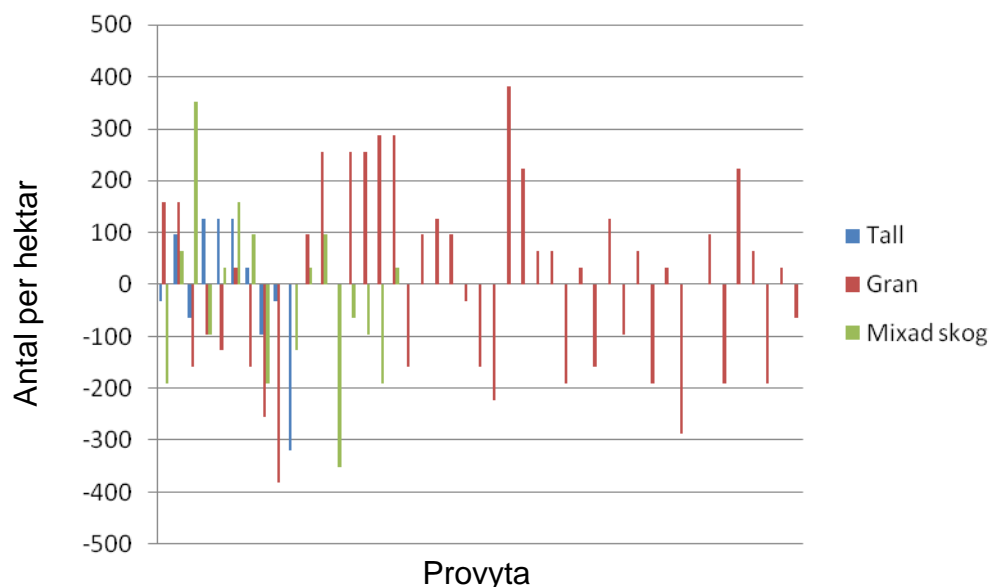
Figur 5. Differens mellan den imputerade medeldiametern och den enligt referensdata för de olika provytorna (mm). Blå stapel = tallandel över 80 %, röd stapel = granandel över 80 %, grön stapel = mixad skog.

Figure 5. Difference between the imputed mean diameter and the one according to the reference data for the different plots (mm). Spruce dominated plots = red stack, pine dominated plots = blue stack, mixed plots = green stack.



Figur 6. Differens mellan den imputerade medelhöjd till sista kap och den enligt referensdata för de olika provytorna (dm). Blå stapel = tallandel över 80 %, röd stapel = granandel över 80 %, grönstapel = mixad skog.

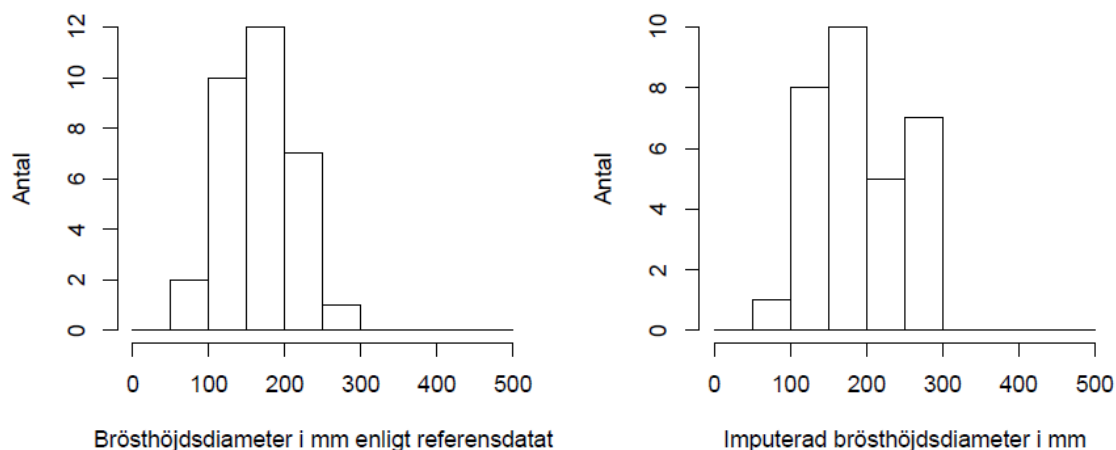
Figure 6. Difference between the imputed mean height to last cut and the one according to the reference data for the different plots (dm). Spruce dominated plots = red stack, pine dominated plots = blue stack, mixed plots = green stack.



Figur 7. Differens mellan de imputerade stamantalet och den enligt referensdata för de olika provytorna (st / ha). Blå stapel = tallandel över 80 %, röd stapel = granandel över 80 %, grönstapel = mixad skog.

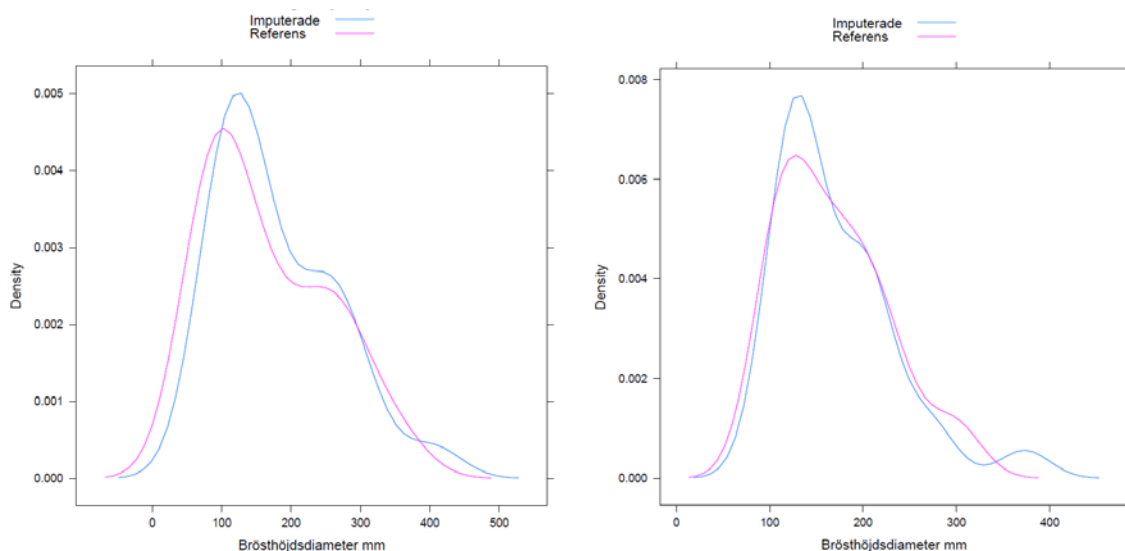
Figure 7. Difference between the numbers of imputed trees and the numbers according to the reference data for the different plots (st / ha). Spruce dominated plots = red stack, pine dominated plots = blue stack, mixed plots = green stack.

I figur 8 återfinns ett exempel på ett histogram över de imputerade träden till en provyta jämfört med referensdata. Figur 9 visar två ”sannolikhetsdiagram” (kernel density estimations) över två provytor.



Figur 8. Histogram med antalet träd i 50 mm diameterklasser för provyta 2.3 enligt imputeringen samt referensdata.

Figure 8. Histogram with the numbers of trees imputed and according to the reference data divided in 50 mm diameter classes per plot 2.3.



Figur 9. Jämförelse mellan imputerad diameterfördelning och diameterfördelning från referensdata för provyta 5.3 och 11.1 i form av ”sannolikhetsdiagram” (kernel density estimations).

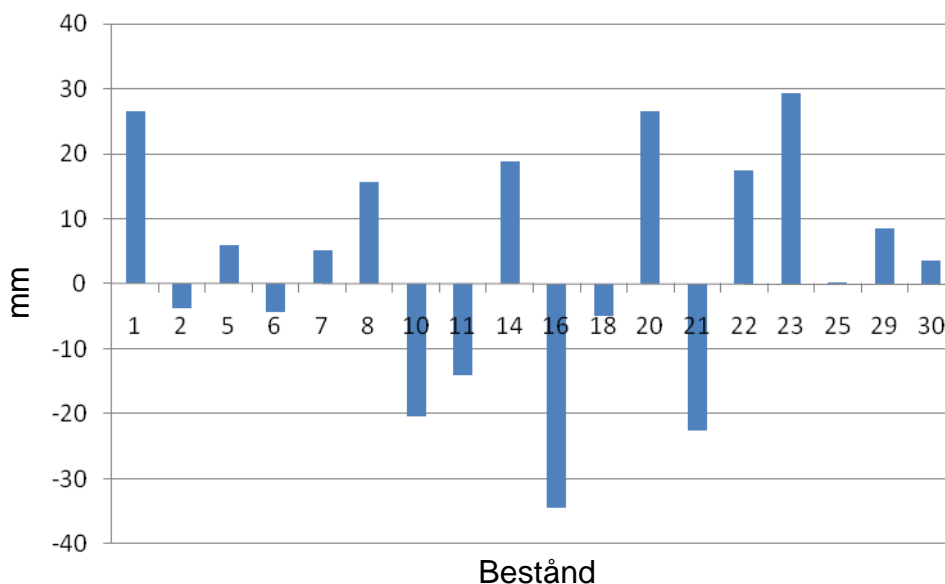
Figure 9. Comparison of density plots between imputed diameter and reference diameter for plot 5.3 and 11.1.

Beståndsnivå (Provytekluster)

Ett bestånd definieras här som fyra ihopslagna provytor vilka är avverkade inom samma trakt, förutom för bestånd 20 och 22 där endast 2, respektive 3, provytor slagits ihop. Bestånden har därför storleken 1256 m² (samt för bestånd 20 och 22, 628 och 942 m²). Beståndsvärden består alltså av data från högst 4 provytor med en radie på 10 meter som ligger med ett förband på 50 m inom samma trakt.

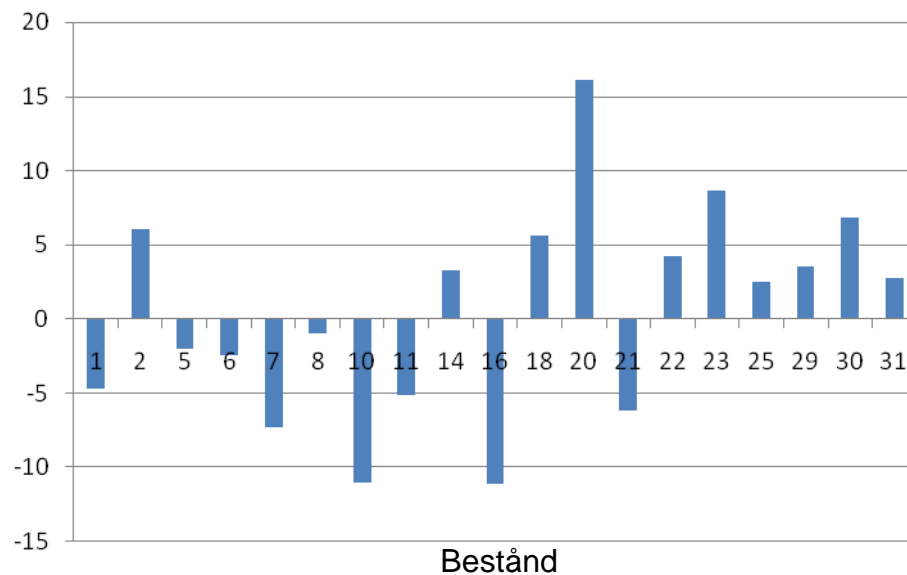
Diameter, höjd, stamantal

Figur 10 redovisar beräknad medelbrösthöjdsdiameter utifrån imputerade data jämfört med referensdata. Figur 11 redovisar beräknad medelhöjd till sista kap jämfört med referensdata. RMSE för brösthöjdsdiameter blev 17.3 mm (8.4 %) och 6.9 dm (5.2 %) för medelhöjden till sista kap. Antalet imputerade träd jämfört med det faktiska antalet avverkade träd inom bestånden har ett RMSE på 111 st / ha (15 %), figur 12.



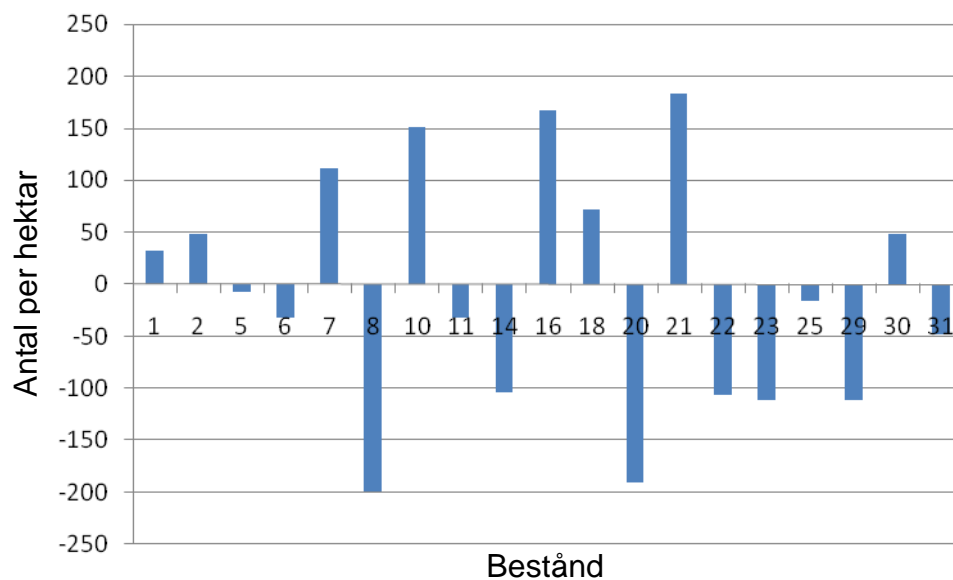
Figur 10. Differens mellan den imputerade medeldiametern och den enligt referensdata på beståndsnivå (mm).

Figure 10. Difference between the imputed mean diameter and the mean diameter according to the reference data at stand level (mm).



Figur 11. Differens mellan den imputerade medelhöjden vid sista kap och den enligt referensdata på beståndsnivå (dm).

Figure 11. Difference between the imputed mean height and the mean height according to the reference data at stand level (dm).



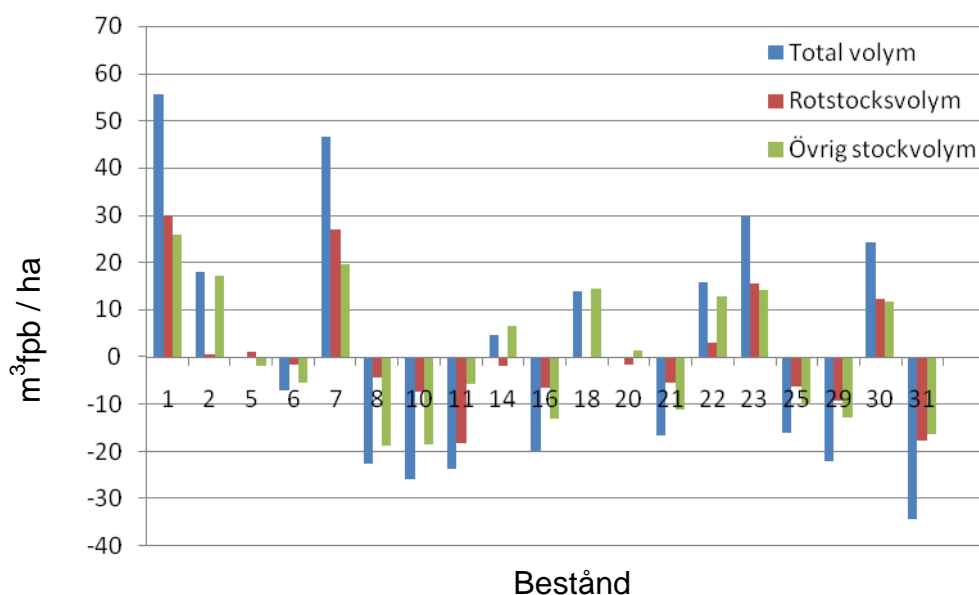
Figur 12. Differens mellan de imputerade stamantalet och de enligt referensdata på beståndsnivå (st / ha).

Figure 12. Difference between the numbers of imputed trees and numbers according to the reference data at stand level (stems / ha).

Volym

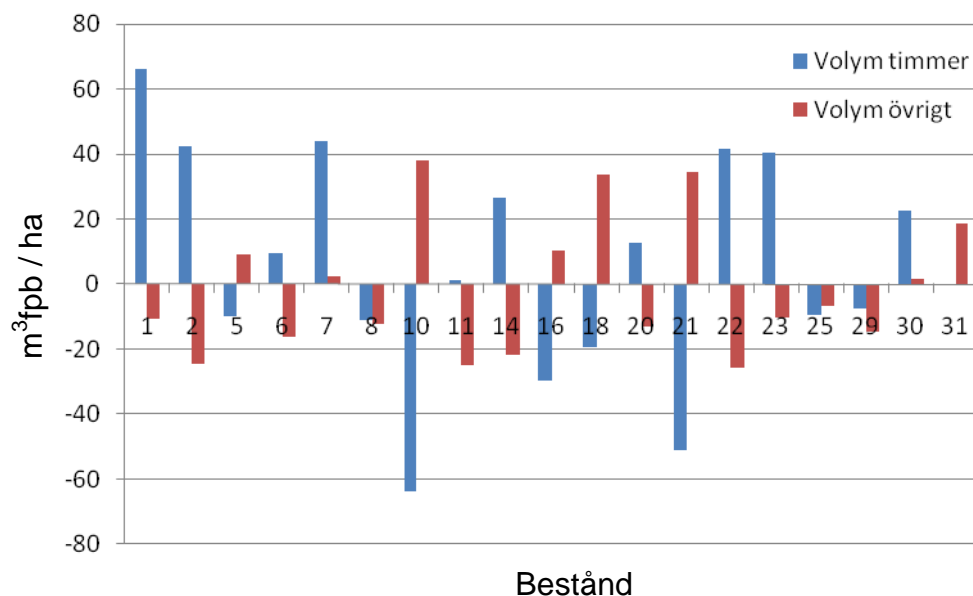
Den totala imputerade stockvolymen ger ett RMSE på 25 m³fpb / ha (10.5 %). Hur de olika volymskattningarna per bestånd ser ut redovisas i figur 13. I figur 13 redovisas även den imputerade rotstocksvolymen samt övrig stockvolym i jämförelse med den skördarapterade stockvolymen i beståndet. Rotstocksvolymen gav ett RMSE på 12.5 m³fpb / ha (10.1 %) och övrig stockvolym hade ett RMSE på 13.9 m³fpb / ha (11.4 %).

Fördelningen av den imputerade volymen i de två olika sortimenten (volym timmer och volym övrigt) gav ett RMSE på 36 m³fpb / ha (22 %) för timmerklassen och för klassen övrigt 20 m³fp / ha (26 %), vilket illustreras i figur 14.



Figur 13. Differens mellan den imputerade volymen och den enligt referensdata på beståndsnivå fördelat på stocktyp ($\text{m}^3\text{fpb} / \text{ha}$). Blå stapel = total stockvolym, röd stapel = rotstocksvolym, grön stapel = övrig stockvolym.

Figure 13. Difference between the reference data and imputed volume in the different log types at stand level ($\text{m}^3\text{fpb} / \text{ha}$). Blue stack = total log volume, red stack = the volume for the first log, log closest to ground, green stack = log volume except the first log.



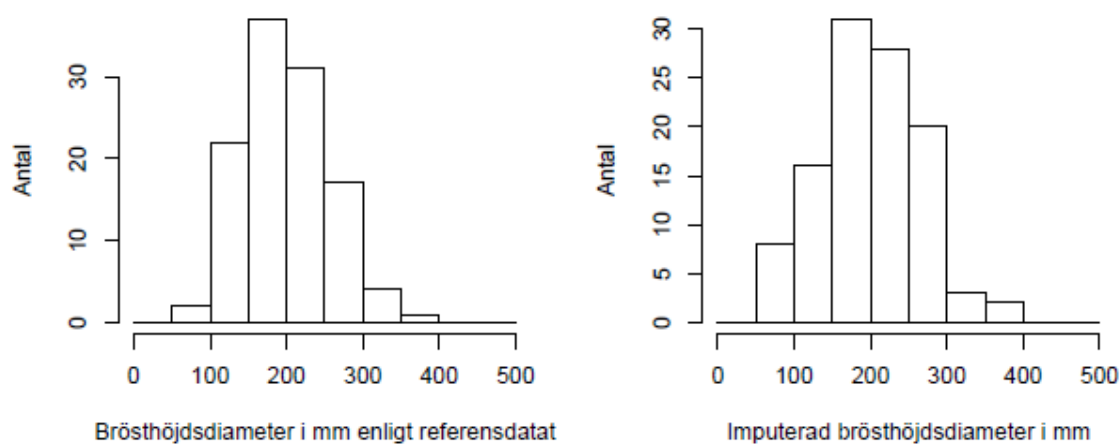
Figur 14. Differens mellan den imputerade volymen och volym enligt referensdata på beståndsnivå, fördelat mellan sortimenten timmer och övrigt ($\text{m}^3\text{fpb} / \text{ha}$). Blå stapel = volym timmer, röd stapel = övrig volym.

Figure 14. Difference between the imputed volume estimation and the reference data in the different assortments at stand level ($\text{m}^3\text{fpb} / \text{ha}$). Blue stack = timber-assortment, red stack = none-timber assortment.

Diameterfördelning

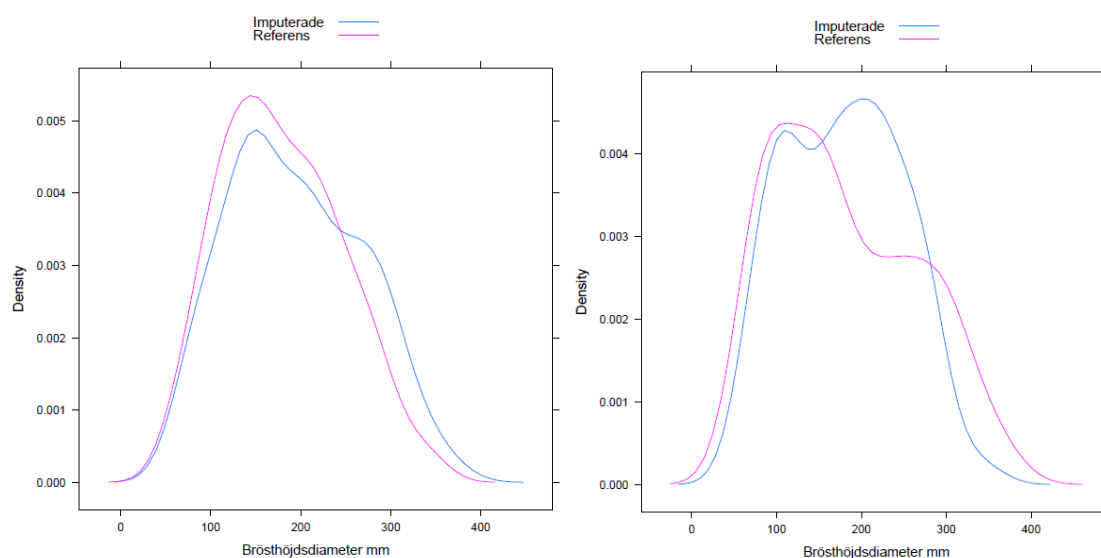
I figur 15 återfinns ett exempel från bestånd 2 på ett histogram över de imputerade trädens diameterfördelning jämfört med referensdata. Diameterfördelningen är gjord i 50 mm klasser.

Figur 16 visar ett ”sannolikhetsdiagram” (kernel density estimations) över ett bestånd. Se bilaga 1 och 2 för histogram och ”sannolikhetsdiagram” över alla bestånden.



Figur 15. Histogram med antalet träd i 50 mm diameterklasser för bestånd 2 enligt imputeringen samt referensdata.

Figure 15. Histogram with the numbers of imputed trees and the numbers according to the reference data divided in 50 mm diameter classes in stand 2.



Figur 16. Jämförelse mellan imputerad diameterfördelning och diameterfördelning från referensdata för bestånd 10 (vänster) och 7 (höger) i form av ”sannolikhetsdiagram” (kernel density estimations).

Figure 16. Comparison of density plots between imputed diameter and the diameter according to the reference data in stand 10 and 7.

Diskussion

Möjliga felkällor

Arbetsgången fram till resultaten har skett i ett flertal olika steg. För varje steg i bearbetningen av data uppstår möjliga felkällor. Fälthinventeringen för med sig en mänsklig faktor där trädmärkning samt registrering kan bli fel. Vidare gick det några månader mellan trädmärkning och avverkning vilket försvårade för skördarföraren att registrera korrekt trädnummer vid fällning och kapning av träd inom provytorna. Vi har dock manuellt jämfört de fältmätta träden med skördarmätningen för att minimera risken för felregistrering.

Vid behandlingen av laserdata finns givetvis en felkälla både vid interpoleringen av mark- och icke-markträffar samt vid bildandet av kronsegment. Fokus i detta examensarbete ligger dock inte på detta men bör finnas med i beaktande av resultatens precision.

Positioneringsfelen för de laserdetekterade träden samt trädpositioneringen gjord i fält får bedömas som små på grund av att både en provytematchning (som föll väl ut) samt en kontroll visuellt i Heureka-fältpapplikation och inne på kontoret i ArcGis-miljö har utförts.

Förfarandet av trädkopplingen i ArcGis 9.3 är gjord genom att de GPS-positionerade träden kopplats till de närmaste laserdetekterade trädet, oavsett om ett annat träd redan kopplats till kronsegmentet. Vid dålig utförd positionering samt kronsegmentering har de uppstått så kallade falska kronsegment (kronsegment utan något träd kopplat till sig) och kronsegment med flera träd kopplade till sig på provytorna. Ibland har det varit rätt (i de fall ett skapat kronsegment bestått av flera träd, oftast småträd som täckts av kronan från det stora trädet) och ibland fel (i de fall trädpositionering blivit fel eller ett falskt kronsegment skapats vid segmenteringen). Falska kronsegment kan också ha uppstått på grund av att träden i fält bedömts vara utanför provytan. Kronsegment med inget GPS-positionerat träd inom 3 meter har bedömts vara falskt.

Sökradien tillfördes för att få ett bättre material vid imputeringen. Obegränsad sökradie hade teoretiskt möjliggjort att GPS-positionerade och avverkade träd kopplats till laserdetekterade träd som de troligen inte tillhörde. Att det bara var 7 st träd av betydelse för virkesutfallet (träd med över 10 cm vid brösthöjd) som inte kopplades till något kronsegment visar på att det hade varit av liten betydelse om en obegränsad sökradie tillåts. Därmed kan också hävdas att både kronsegmenteringen och trädpositioneringen fallit väl ut.

Orsaken till att 14 träd saknade koppling till kronsegment kan både vara dålig kronsegmentering eller en dålig positionering av trädet. Eftersom det var så få träd som påverkades av sökradien uteslöts dessa 14 träd helt vid utvärderingen (även från referensdata). En jämförelse mot en trädlista med alla träd skulle inte vara rättvisande med tanke på att alla träd inte tagits med vid imputeringsprocessen. Därmed vet vi inte hur det skulle ha påverkat trädlistan skapad vid imputeringen (även om den påverkan kan antas vara mycket liten eftersom de borttagna träden var både få och av liten betydelse för virkesutfallet).

Vid fortsatt utveckling av metoden borde man kunna undvika att använda en sökradie, speciellt om trädpositionering samt kronsegmentering bedöms vara väl utförda.

Error index

Error index (EI) ger en bild över hur väl metoden kan användas för att förutse diameterfördelningen. I det här fallet har ingen viktning gjorts med beaktande på diameterklassen i fråga. Det man kunde tänkas göra är att väga upp de klasser som tillför mera volym (Reynolds m fl 1988). Error index-beräkningarna visar på tydliga förbättringar vid utvärdering på beståndsnivå jämför med provytenivå. Eftersom bestånden i det här fallet är omkring 0.1 ha kan man förvänta sig ett än bättre resultat vid praktisk tillämpning på beståndsnivå (bestånd > 0.1 ha). Jämförs error index-beräkningarna med de från en tidigare studie gjord på SLU får de bedömas som goda (Wallerman m fl. 2007).

Diameterskattning

Det är vid diamettermätningarna som den stora potentiella fördelen med den här typen av datainsamlingsmetod finns. För varje laserdetekterat träd imputeras en fullständig stamprofil med mätningar av diametern var 10:e cm. Vidare skattas inte bara en medeldiameter utan även fördelningen. Medeldiametern har ett RMSE på 17 mm på beståndsnivå, mindre än de klassindelningar vi valt att presentera histogramen och error index-beräkningarna med (50 mm diameterklasser).

Höjdskattning

Det är känt att man kan skatta trädhöjd bra med laserskanning jämfört med andra fjärranalysmetoder (Magnusson 2006). Utnyttjandet av flygburen laserskanning som metod för att bedöma medelhöjden visade sig även bra i detta examensarbete. Medelhöjden till sista kap har ett RMSE på omkring 5 % vid utvärdering på beståndsnivå, vilket i jämförelse med att skatta medelhöjd med andra metoder står sig väl (Magnusson 2006). Detta speciellt med tanke på hur små bestånden i det här fallet är (ca 0,1 ha).

Stamantal

Stamantalet är av stor betydelse för att få en bra skattning av diameterfördelningen i ett bestånd. Tidigare studier vid användandet av laserdata för att detektera enskilda träd har identifierat omkring 70 % av träden med en diameter över > 5 cm (Persson, Holmgren, & Söderman 2002). Det finns en rad faktorer med denna metod som påverkar hur väl skattningarna av stamantalet faller ut, dels beror det på hur väl kronsegmenteringen lyckats och dels hur bra trädkopplingen mellan kronsegmenten och de avverkade träden blir. Det har vid trädkopplingen uppstått kronsegment utan någon trädkoppling och en del kronsegment har kopplats till flera träd. Vid imputeringsprocessen har dessa kronsegment med flera trädstammar behandlats som kronsegment med ett träd. Även kronsegment utan någon trädkoppling har funnits med i referensmaterialet, så kallade falska kronsegment. Däremot har alla träd kopplade till de imputerade kronsegmentet lyfts in vid utvärderingen. Det har ökat chansen att mindre träd också följt med, vilket möjligen kan förbättra skattningen av stamantalet jämfört med att bara använda sig utav kronsegmentering från laserdata. Skattningen av stamantalet har ett RMSE på 15 % på beståndsnivå i denna studie. En bättre skattning kan förväntas för större bestånd (> 0,1 ha).

Volymskattning

Jämförelse av volymskattningar med andra fjärranalysmetoder visar på liknande eller bättre resultat (Magnusson 2006). Med tanke på storleken på bestånden och den stora förbättring som uppnås mellan provytevis utvärdering och beståndsvis, finns indikationer på att eventuell volymskattning vid praktisk tillämpning på bestånd med storlekar över 0,1 ha skulle bli fullt användbara. Vid subjektiva volymskattningar med hjälp av relaskopmätningar ligger

medelfelet på omkring 14 % och då mycket beroende på förrättningsmannen (Ståhl 1992), jämfört med ett RMSE för medelvolymen per bestånd (0,1 ha) på 11 % med denna metod. Subjektiva volymskattningar ger oftast inte heller någon bild över hur volymerna fördelar sig över de olika diameterklasserna och sortimenten, något som är möjligt vid imputering av stm-filer.

Volymskattningarna per stocktyp har medelfel liknande skattningar av den totala volymen (dryg 10 %). Vid redovisning ända ner på sortimentnivå blir skattningarna sämre. RMSE på mellan 22 – 26 % för de två olika sortimenten visar på att vidare studier kring metoden är nödvändig för att uppnå de potentiellt största fördelarna.

Resultatens användbarhet

Resultaten visar på tydliga skillnader mellan utvärdering på provytenivå och beståndsnivå. Eftersom ett litet fel i imputeringen på provytenivå kan få stora konsekvenser bör inte utvärdering av metoden ske på lägre nivå än bestånd. Bestånden i detta fall får dessutom bedömas som små och resultatet tyder på att bättre precision skulle uppnås vid utvärdering på större bestånd än i detta fall. Bestånden kan snarare betraktas som provytekuster än fullständiga bestånd.

Traditionella skattningar av virkeutfall med hjälp av fjärranalysmetoder har både något bättre samt något sämre precision än den i examensarbetet testade (Magnusson 2006). Den stora fördelen med den här datainsamlingsmetoden ligger dock i att det blir möjligt att använda stm-filer för uppbyggnad av en traktbank. Det skulle göra det möjligt att för de olika trakterna prova olika prislister och simulera olika apteringsrutiner. Detta skulle medföra bättre prognoser av produkter innan avverkning och därmed skapa större möjligheter att välja ut de objekt i traktbanken som för tillfället bäst möter efterfrågan hos kunderna i industrin. Samtidigt som en fältinventering i idealfallet inte vore nödvändig.

Eftersom det inte gjorts särskilt många studier kring denna metod skulle stora förbättringsmöjligheter kunna uppnås. Skattningarna inom detta examensarbete har betydligt bättre noggrannhet än vad skattningarna hade inom en tidigare studie med liknande metoder (Wallerman m fl. 2007).

Med en välutvecklad kronsegmentering och trädmatchning finns mycket att vinna. Om falska kronsegment skulle kunna skiljas ut på ett effektivare sätt skulle det medföra en säkrare imputeringsprocess. Likaså skulle en bättre kronsegmentering och trädpositionering medföra en bättre trädkoppling. Om det för varje trädkoppling skulle finnas ett kronsegment skulle imputeringsprocessen bli säkrare. Tillvägagångssättet medför att flera träd kan kopplas till samma kronsegment. Information om detta tas sedan inte med vid själva imputeringsprocessen vilket gör att ett kronsegment med flera trädkopplingar och ett kronsegment med en trädkoppling värderas lika vid själva imputeringen (om trädegenskaperna är densamma mellan det största trädet i det kronsegment med flera trädkopplingar som för de kronsegment med en trädkoppling). Om det skulle vara möjligt att skapa en perfekt kronsegmentering och trädkoppling är detta en felkälla som skulle försvinna. För det här materialet var laserskanningens punkttäthet omkring 5 mätningar per kvadratmeter. De konsultfirmor som detekterar träd brukar använda sig utav en punkttäthet på minst ca 10 mätningar per kvadratmeter. Det är alltså troligt att laserdata som använts i detta examensarbete ligger nära brytpunkten där punkttätheten påverkar andelen upptäckta träd (antalet träd inom samma kronsegment). Punkttätheten är givetvis en kostnadsfråga vid användandet i ett praktiskt skogsbruk

En viktig variabel som inte alls tas med eller analyseras i examensarbetet är trädslagsblandningen. Det är dock möjligt att vid imputeringsprocessen föra in en kategorisk variabel som beskriver trädslagen. Ett annat sätt att lösa problematiken vore att utgå från den trädslagsblandning över områdena som finns registrerade sedan tidigare och dela upp imputeringsprocessen trädslagvis.

Slutsatser

Metoden står sig väl vid utvärdering på beståndsnivå (~ 0,1 ha). Bäst resultat uppnås vid skattning av medelhöjd. Imputeringen ger en bild över fördelningen mellan de olika diameterklasserna men är inte så exakt som man kanske skulle önska. Resultaten är bättre jämfört med den tidigare studie som är gjord på SLU (Wallerman m fl. 2007). Mer forskning inom ämnet är dock nödvändigt innan metoden skulle kunna användas fullt ut. Det är viktigt att finna en teknisk lösning för att automatiskt kunna positionera träden vid avverkning för att kunna koppla till laserdata. Vidare finns det också mycket att förbättra i imputeringsprocessen.

Detta examensarbete visar att:

- Metoden inte lämpar sig för mindre områden än 0,1 ha
- Metoden ger en vägvisande bild över diameterfördelningen
- Metoden ger rimliga skattningar av volym och medeldiameter
- Metoden ger bäst skattning för medelhöjd
- Det finns en stor utvecklingspotential av metoden, främst kring trädkopplings- och imputeringsprocessen

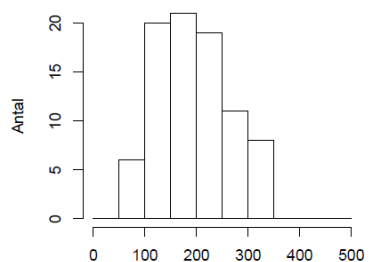
Referenser

- Anon. 2008a. The Standard for Forest Data (StanForD). Löpande uppdateringar av Skogforsk på www.skogforsk.se.
- Anon. 2008b. The R Foundation for Statistical Computing (R-project). Löpande uppdateringar av R foundation på www.r-project.org.
- Arlinger, J. Moberg, L. Wilhelmsson, L. 2002. Predictions of wood properties using simulation software for harvesters. IUFRO Proceeding, 8s.
- Arlinger J & Möller J. 2007. Virkesvärdestest 2006 - mätnoggrannhet. Resultat Nr 5, Skogforsk, 4 ss.
- Arlinger J & Möller J. 2006. Kvalitetssäkring av skördarnas mätning. Resultat Nr 20, Skogforsk, 4 ss.
- Axelsson, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33:110-117.
- Axelsson, P. 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54:138-147.
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 2 3, s 164–198.
- Crookston, N.L. & Finley, A.O. 2007. yaImpute: An R Package for kNN Imputation. Journal of Statistical Software, Volume 23, Issue 10, ISSN: 15487660, 16s.
- Fornander, P. 1999. Utvärdering av objektiv provytetaxering. Examensarbete 1999:4, Skogsingenjörsprogrammet.
- Hansson, F. 1999. Inventering före avverkning – metoder och resursåtgång. Arbetsrapport 434, Skogforsk, 20s.
- Holmgren, J. & Wallerman, J. 2007. Estimation of tree size distribution by combining vertical and horizontal distribution of LIDAR measurement with extraction of individual trees. In: Workshop on 3D Remote Sensing Forestry, Vienna, Austria, s 168-173.
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area, and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. Scand. J. For. Res. 19: 543-553.
- Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Dept. of Forest Resource Management and Geomatics, SLU, Umeå, Sweden. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae - Silvestria, 2003 (Nr. 278) 43s. + Appendices I-V.
- Holmgren, J. & Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sens. Environ. 90: 415-423.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. och Maltamo, M. 2008. Review of methods of smallfootprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. International Journal of RemoteSensing, 29:5,1339 — 1366.
- Hyypä, J., H. Hyypä, P. Litkey, X. Yu, H. Haggren, R. Petri, U. Pyysalo, J. Pitkänen, och M. Maltamo, 2004. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements, Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2 on Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment, Freiburg, Tyskland, XXXVI (8/W2).
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68, 925-932.
- Lindgren, O. 1983. Inventering av skogsbestånd – en metodöversikt. Inventering och ekonomi, nr 4, Skogsfakta, 4s.
- Magnusson, M. 2006. Evaluation of Remote Sensing Techniques for Estimation of Forest Variables at Stand Level. Dept. of Forest Resource Management and Geomatics, SLU, Umeå, Sweden. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae – Silvestria, 2006 (Nr. 85) 38s.
- Moeur, M. & Stage, A.R. 1995. Most Similar Neighbor - An improved sampling inference

- procedure for natural-resource planning. *Forest Science* 41, 337-359.
- Möller, J. 1998. Virkesmätning med skördare. Resultat Nr 16. Skogforsk, 4 ss.
- Olofsson, K, Lindberg, E & Holmgren, J. 2008. A method for linking field-surveyed and aerial-detected single trees using cross correlation of position images and the optimization of weighted tree list graphs. *SilviLaser* 2008, Sept. 17-19, 2008 – Edinburgh, UK.
- Reynold, M. M fl. 1988. Goodness-of-Fit Tests and Model Selection Procedures for Diameter distributon models. *Forest Science*, Vol. 34, Nr. 2, ss. 373-399.
- Sondell, J & Möller, J. 2003. Timber business based on harvester information. Arbetsrapport Nr 537 Maj, Skogforsk, s 26-34.
- Ståhl, G. 1992. En studie av kvalitet i skogliga avdelningsdata som insamlats med subjektiva inventeringsmetoder. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Forest Management, Umeå, Sweden, Rapport 24. 127s. ISSN 0349-2133.
- Wallerman, J., Holmgren, J., and Moberg L. 2007. Data acquisition for harvest scheduling using single-tree detection in LiDAR data. *ForestSat 2007 Conference*, November 5-7, 2007, Montpellier, France.
- Wehr, A. Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 54, Issues 2-3, July 1999, s 68-82.

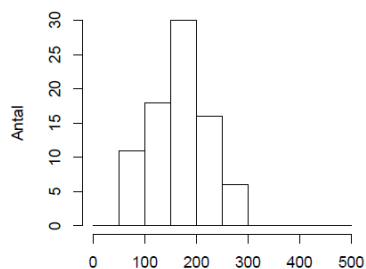
Bilaga 1

Diameterfördelning för bestånd 1000



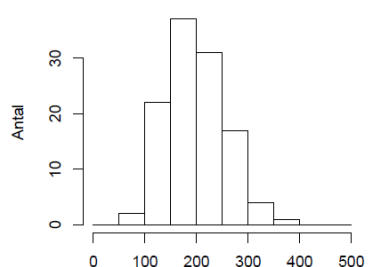
Brösthöjdsdiameter i mm enligt referensdatat

Diameterfördelning för bestånd 1000



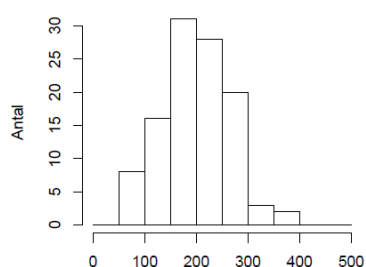
Imputerad brösthöjdsdiameter i mm

Diameterfördelning för bestånd 2000



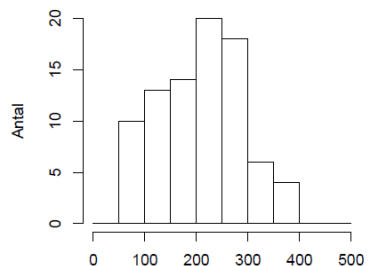
Brösthöjdsdiameter i mm enligt referensdatat

Diameterfördelning för bestånd 2000



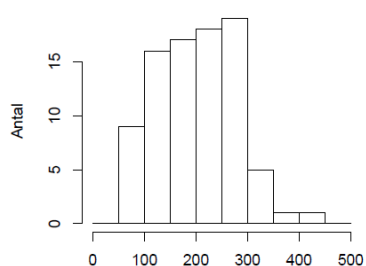
Imputerad brösthöjdsdiameter i mm

Diameterfördelning för bestånd 5000



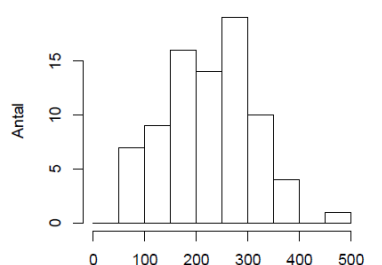
Brösthöjdsdiameter i mm enligt referensdatat

Diameterfördelning för bestånd 5000



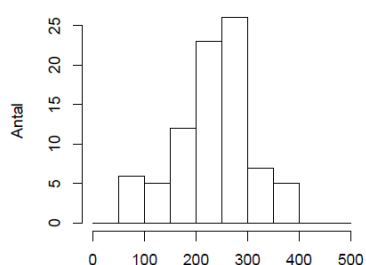
Imputerad brösthöjdsdiameter i mm

Diameterfördelning för bestånd 6000

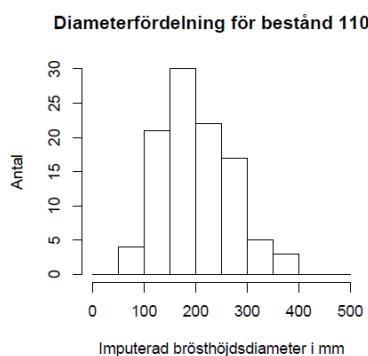
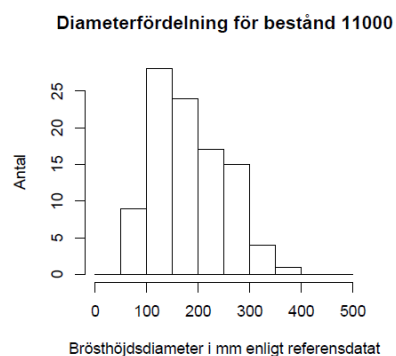
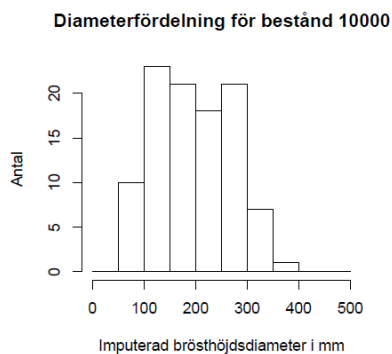
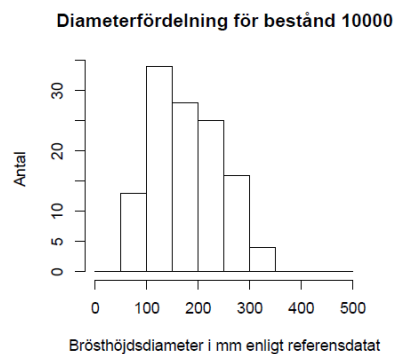
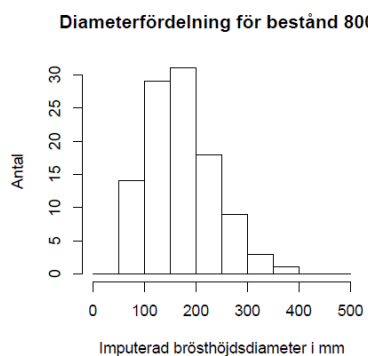
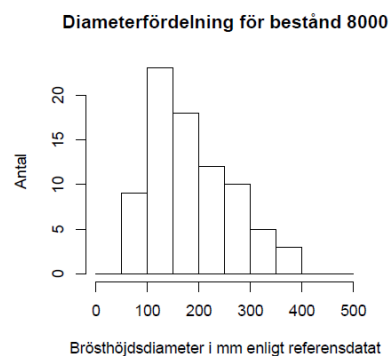
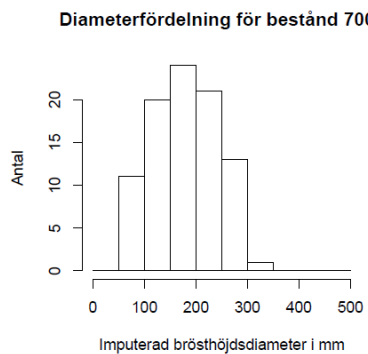
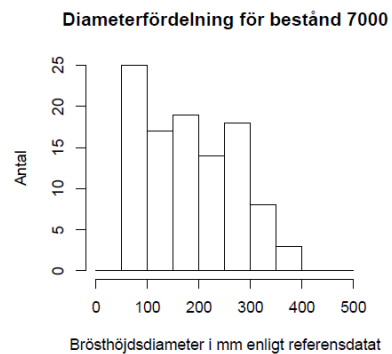


Brösthöjdsdiameter i mm enligt referensdatat

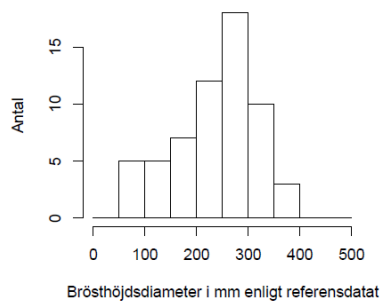
Diameterfördelning för bestånd 6000



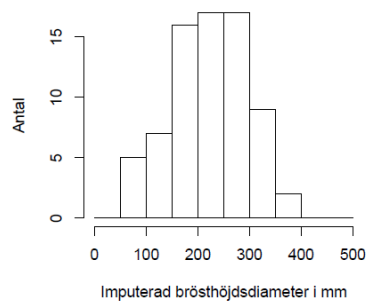
Imputerad brösthöjdsdiameter i mm



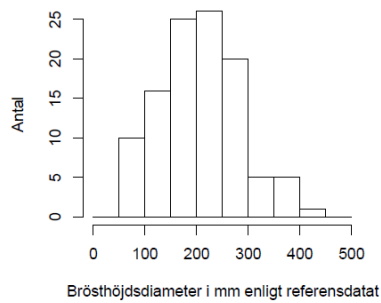
Diameterfördelning för bestånd 14000



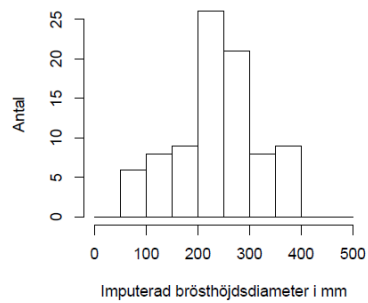
Diameterfördelning för bestånd 14000



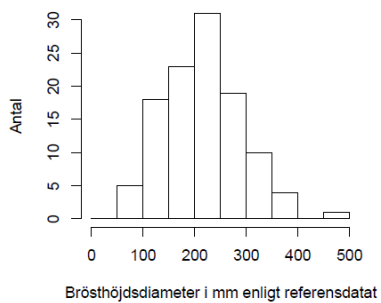
Diameterfördelning för bestånd 16000



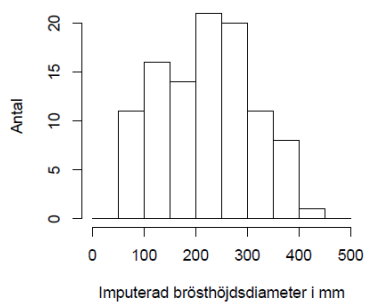
Diameterfördelning för bestånd 16000



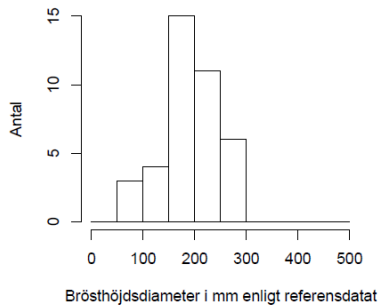
Diameterfördelning för bestånd 18000



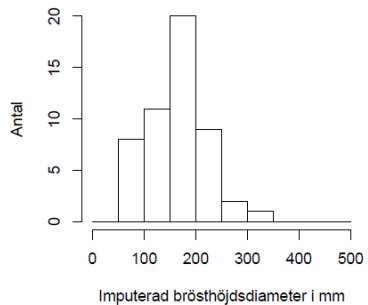
Diameterfördelning för bestånd 18000



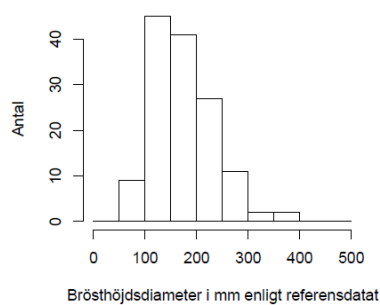
Diameterfördelning för bestånd 20000



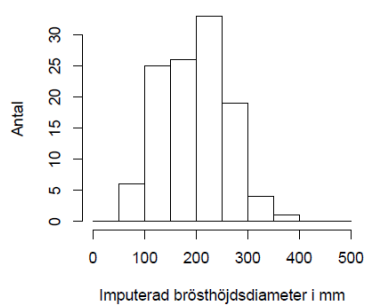
Diameterfördelning för bestånd 20000



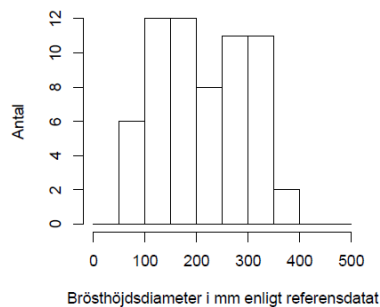
Diameterfördelning för bestånd 21000



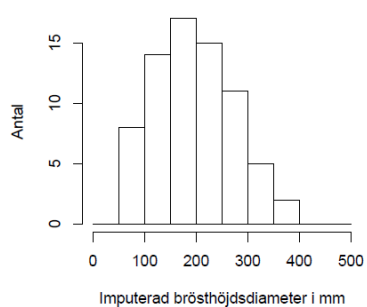
Diameterfördelning för bestånd 21000



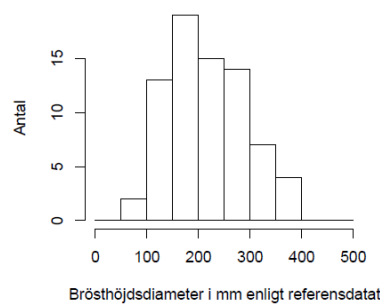
Diameterfördelning för bestånd 22000



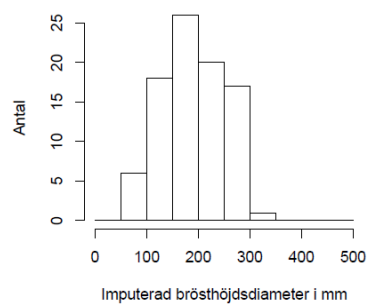
Diameterfördelning för bestånd 22000



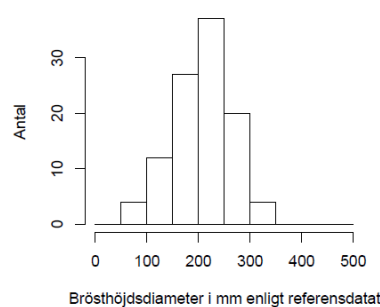
Diameterfördelning för bestånd 23000



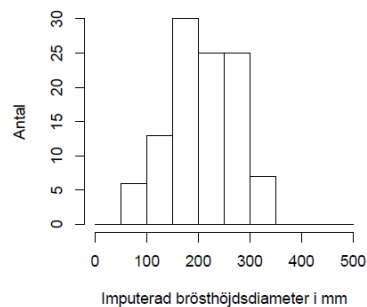
Diameterfördelning för bestånd 23000



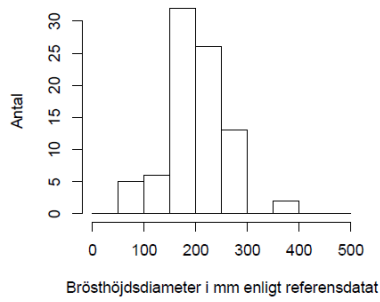
Diameterfördelning för bestånd 25000



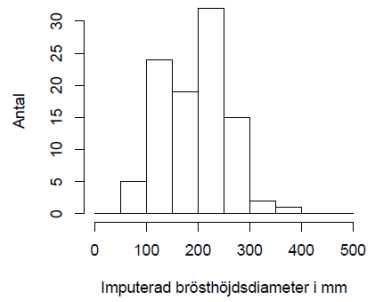
Diameterfördelning för bestånd 25000



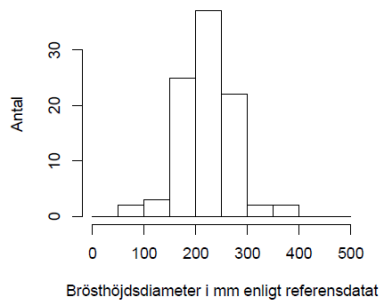
Diameterfördelning för bestånd 29000



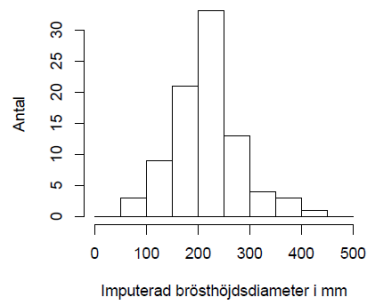
Diameterfördelning för bestånd 29000



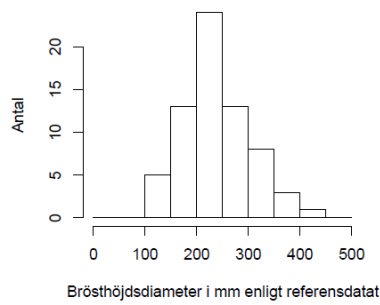
Diameterfördelning för bestånd 30000



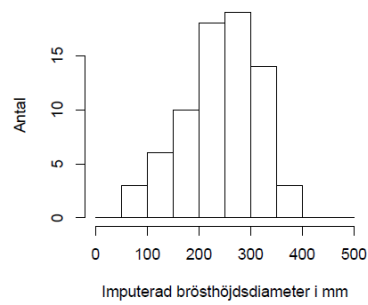
Diameterfördelning för bestånd 30000



Diameterfördelning för bestånd 31000



Diameterfördelning för bestånd 31000



Bilaga 2

